

Opérations topologiques pour la géomorphologie

Richard Bézin^{1,2}, Benoît Crespin¹, Xavier Skapin², Olivier Terraz¹ et Philippe Meseure²

¹XLIM-DMI de l'Université de Limoges

²XLIM-SIC de l'Université de Poitiers

Résumé

Les paysages naturels résultent d'une succession d'événements géomorphologiques qu'il convient de simuler pour produire des résultats plausibles. En particulier, les changements topologiques doivent être pris en compte durant la formation de géométries complexes comme les arches, les ponts ou les tunnels naturels. Nous présentons une nouvelle approche pour simuler les évolutions géomorphologiques d'un terrain en 3D conçu comme un ensemble de volumes définis dans un modèle topologique, et décrivons un ensemble d'opérations atomiques afin de gérer les événements topologiques de manière robuste. Ces opérations sont combinées pour produire des scénarios d'évolutions plus complexes dans un modèle basé sur les cartes généralisées, permettant de réduire le coût mémoire par rapport aux méthodes utilisant des voxels par exemple.

Mots clé : Informatique Graphique, modélisation géométrique

1. Introduction

Dans cet article, nous traitons des problèmes de gestion des événements topologiques qui surviennent lors d'une évolution géomorphologique d'un terrain en 3D. La simulation d'un processus géomorphologique trouve son application principale dans la création semi-automatique de paysages visuellement réalistes, où les artistes sont capables de simuler des phénomènes spécifiques sur un terrain 3D et de contrôler les résultats dynamiquement. De tels phénomènes incluent des processus d'érosion (dus à la pluie, au vent, à l'écoulement des rivières, etc.) qui contribuent à modifier la géométrie des paysages et ajouter du réalisme aux environnements synthétisés que l'on trouve dans les films d'animations, les cybermondes ou autres types de jeux vidéos.

Les évolutions géomorphologiques peuvent générer des géométries très complexes dans la nature, par exemple des formes concaves comme des cavernes, des roches des fées ou des surplombs. De plus, la topologie d'un terrain peut être modifiée au cours des années et voir émerger des arches naturelles, des ponts, des tunnels, etc. Lors d'une simulation, ces événements topologiques doivent être dé-

tectés et gérés correctement pour maintenir la cohérence géométrique, comme illustré Fig. 1.

La plupart des processus géomorphologiques dépendent du type de matériaux qui constituent le sol. Par exemple, l'érosion pluviale causée par les éclaboussures aura un impact différent sur un sol fait de sable, d'argile, ou de granit : ceci est appelé l'érosion *différentielle*. Encore une fois cela peut générer des géométries complexes si une couche de roche avec un taux d'érosion élevé est complètement emportée, exposant une roche sous-jacente plus résistante. Ainsi, pour une simulation sur ordinateur il faut être capable d'instancier des sous-volumes de types différents dans le sol pour gérer des scénarios d'érosion différentielle.

Les travaux existants ont une limitation majeure due à la consommation mémoire significative qu'induit la représentation 3D des terrains par des voxels ou des structures de données en couche. Même si les différents types de matériaux et les géométries complexes sont pris en compte, les matériaux doivent être discrétisés, à l'exception de [TJ10] qui requiert néanmoins une triangulation à la volée coûteuse en temps de calcul.

En s'appuyant sur les travaux antérieurs restreints à deux dimensions [LSM08], nous proposons d'utiliser le modèle des *cartes généralisées* comme approche de base pour la discrétisation afin de détecter et gérer les événements topologiques. Dans cet article, nous nous penchons sur les

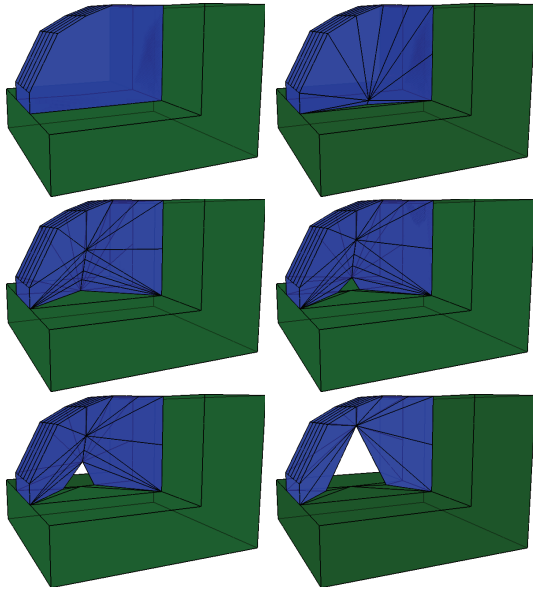


Figure 1: Formation d'une arche par érosion progressive de la base du volume bleu.

opérations topologiques qui maintiennent la cohérence de la structure du sous-sol à chaque pas de la simulation du processus géomorphologique. Notre but n'est pas de générer des scènes visuellement réalistes mais plutôt de montrer que des scénarios complexes impliquant des changements topologiques peuvent facilement être réduits à un ensemble d'opérations topologiques atomiques successives. Nous montrons également comment ces opérations peuvent être implantées dans un modèleur topologique.

La suite du papier est organisée comme suit. La section suivante traite des travaux antérieurs et introduit différents modèles topologiques. La section 3 décrit les opérations atomiques appliquées au modèle topologique du terrain en 3D, basées sur des événements topologiques. L'implantation de processus géomorphologiques complexes dans un modèleur topologique est décrite dans la section 5 et la section 6 présente nos conclusions et idées pour les travaux futurs.

2. Travaux antérieurs

2.1. Représentation 3D du terrain pour des applications en géomorphologie

Les travaux existants en relation avec notre papier se situent pour la plupart dans le domaine de la modélisation de terrain à base physique. Intempéries, érosion fluviale et d'autres phénomènes naturels peuvent être simulés pour générer des terrains visuellement réalistes pour des applications variées, par modification itérative d'un terrain initial. La représentation du terrain est donc l'une des parties les plus critiques, mais d'autres aspects doivent aussi être pris

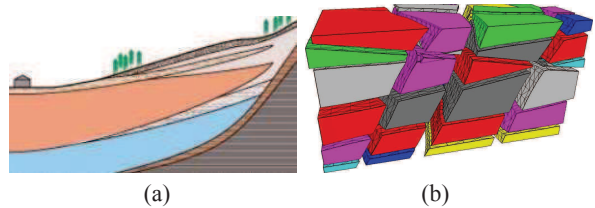


Figure 2: (a) Représentation géologique en 2D d'un terrain réel. (b) Vue explosée d'un modèle 3D d'un terrain synthétique.

en compte afin de produire des résultats plausibles, comme utiliser un modèle de fluide efficace dans le cas d'une simulation d'érosion fluviale.

Les représentations géologiques d'un terrain incluent habituellement les différents éléments qui constituent le sol (Fig. 2a). Ces éléments sont définis par différents attributs comme la géométrie 3D, le type de roche, la dureté, la porosité, la perméabilité, la saturation en eau ou autres fluides, etc. Ils ont une influence sur le processus de géomorphologie sur des échelles spatiales et temporelles différentes, des événements tectoniques qui forment les continents jusqu'aux processus biologiques comme la création de terriers par des animaux. Dans le cas de processus hydrauliques ou éoliens, l'érosion *différentielle* peut être observée sur des sols composés de roches de dureté non uniforme.

La plupart des travaux existants en informatique graphique se concentrent sur la modélisation de terrain 3D appliquée à la simulation d'érosion, où la géométrie 3D et la vitesse d'érosion sont les attributs les plus importants. La représentation du terrain peut être limitée à la surface, en utilisant des cartes de hauteurs [Nag98, ZSTR07, KBKO09, BPC*10]. Cette approche simple possède de sérieuses limitations : l'érosion est normalement limitée à des déformations verticales, puisqu'une érosion latérale peut créer des auto-intersections ou d'autres problèmes topologiques. Par conséquent, même si des résultats visuellement impressionnants sont obtenus dans [KBKO09] en utilisant une simulation de fluide à base de SPH, les concavités ou les trous ne peuvent pas être gérés, ce qui empêche la formation d'arches, cavernes, etc.

Depuis les dix dernières années, plusieurs auteurs ont étudié des représentations à base de voxels. Dans ce cas, chaque voxel contient des informations à propos du type et de la quantité de matériau qu'il contient, ce qui permet de modéliser des sols réels incluant différents types de roches et vitesses d'érosion [DEJ*99, OF99]. Une connexion explicite entre des volumes de roches est représentée dans [IFMC03]; cette connexion peut se briser sous l'effet de forces de tension pour créer des crevasses. Des objets rigides sont représentés par des *level sets* dans [WCMT07]

pour simuler des phénomènes différents comme une érosion par le sable ou une corrosion par l'acide, qui peuvent induire des changements topologiques et créer des fractures. Étant donné que les voxels peuvent aussi contenir de l'air (ou simplement être marqués comme étant "vides"), une grille 3D de voxels peut modéliser n'importe quelle géométrie complexe incluant des concavités ou des trous, ce qui permet de sculpter des grottes dans la roche [BTHB05] ou la création de roches des fées [BFO*07, MMJM09]. Cette capacité à simuler des phénomènes réels est montrée dans [CSC*10] en comparant des expérimentations réelles et des simulations d'érosion sur un terrain 3D avec un modèle de SPH.

Le défaut majeur des représentations à base de voxels est leur coût excessif en mémoire et en calcul, même si on stocke seulement les voxels actifs utilisés [BFO*07]. Une *structure de données en couche* peut être utilisée pour surmonter cette limitation en combinant les cartes de hauteur et les voxels : pour un point donné sur la carte, au lieu de stocker un ensemble de voxels, on stocke un ensemble de couches définies par leur type et leur hauteur. Les voxels consécutifs de même type seront considérés comme une même couche, mais il faut adapter les algorithmes d'érosion [BF01, vBBK08]. Cette approche peut aussi être implémentée sur GPU [NWD05, MDH07, KBKO09]. Des couches de matériaux incluant air, eau, roches et sables sont utilisées dans [PGMG09] pour créer des géométries complexes comme des arches. Malheureusement, cette approche nécessite encore une quantité significative de mémoire, ainsi qu'une phase de polygonisation pour générer les triangles utilisés pour le rendu.

Comme montré sur la Fig. 2b, une approche alternative serait d'utiliser directement une représentation par bord (B-Rep) du sous-sol comme dans [BSP*04]. Des opérations booléennes sur un modèle volumique ont été implantées dans [ZLL07] pour simuler des excavations, des forages, etc. Toutefois, les opérations booléennes ne sont pas bien adaptées à des simulations d'érosion qui impliquent habituellement de très petits déplacements successifs. Une représentation volumique est calculée dans [TJ10] à partir d'un nuage de points représentant la surface du terrain par un maillage de Delaunay dynamique déformable [PB07]. Cette approche est capable de produire des arches et d'autres géométries complexes de terrains en utilisant la résistance implicite de la roche, tout en réduisant les besoins en mémoire à une représentation à base de points. Néanmoins, cela requiert une triangulation de Delaunay à chaque pas de la simulation afin de maintenir un étiquetage correct des volumes, et représenter différents types de roches n'est pas aussi simple avec cette approche.

Nous concluons que même si les modèles volumiques pallient la limitation de mémoire des représentations en voxels ou structures de données en couches, des recherches sont encore nécessaires afin de simuler un processus géomorphologique qui implique des sous-volumes de différents

types de matériaux, et qui gère les interactions entre ces volumes. Cette représentation macroscopique pourrait être utilisée également pendant la simulation afin de pallier les inter-pénétrations entre sous-volumes et détecter les changements *topologiques*, comme illustré Fig. 1.

2.2. Modèles topologiques

Comme mentionné plus tôt, nous avons besoin d'un modèle topologique capable de subdiviser des volumes et par extension de représenter l'évolution dynamique d'un terrain en 3D, aussi bien que de détecter des incohérences topologiques.

Nous avons choisi d'utiliser un modèle basé sur les *cartes généralisées* [Lie91, Lie94], une extension des cartes combinatoires [Edm60]. Ce modèle topologique est basé sur une représentation compacte et uniforme qui simplifie la définition et l'évolution des algorithmes dans n'importe quelle dimension. Elle rend aussi plus simple l'implantation de modifications de maillages comme la triangulation, l'insertion de sommets, arêtes, faces et volumes, aussi bien que la recherche de voisinage en temps constant. Un choix similaire a été fait dans [LSM08] pour simuler l'évolution d'un terrain en 2D, ce qui limite le nombre de cas possibles. Les cartes généralisées ont été utilisées avec succès à d'autres fins dans le domaine des simulations physiquement ou biologiquement inspirées telles que la détection de collision [JCD10] ou la simulation de croissance [TGM*08].

2.3. Nos contributions

Les contributions principales de notre travail sont :

- **Des Opérations atomiques d'évolution** créées à partir d'un ensemble d'opérations topologiques simples comme la contraction d'arêtes, l'insertion de sommets, etc (section 3).
- **Une approche générique pour simuler l'évolution d'un volume 3D subdivisé.** Notre travail repose sur une structure de données et des algorithmes aussi génériques que possible. Nous montrons comment appliquer un processus d'animation et de déformation à un terrain en 3D, et comment ces opérations peuvent être implémentées avec le formalisme des cartes généralisées (section 4).
- **Des scénarios complexes d'évolutions** sont implantés utilisant seulement ces opérations atomiques pour créer une arche naturelle, un tunnel ou autres géométries concaves découlant du processus géomorphologique (section 4).

La définition explicite des B-Rep intégrée dans le modèle topologique est un autre avantage sur les méthodes énumérées dans la section précédente.

3. Opérations topologiques

Le terrain en 3D est subdivisé en différents volumes comme montré sur la Fig. 2, et sa représentation par bord est une collection de faces.

Notre simulation géomorphologique peut être divisée en trois étapes principales :

- À chaque pas de temps, la simulation géomorphologique a un impact sur les bords du terrain (*e.g.* les particules de fluide collisionnent le sol).
- Le déplacement des sommets est calculé en fonction de la direction et de la magnitude des impacts et des propriétés du volume impacté (matériau, érodabilité, etc). Nous assumons que ces déplacements sont linéaires, en effet le calcul de trajectoires non-linéaires serait trop fastidieux pour obtenir des temps interactifs.
- Le déplacement des sommets peut provoquer des incohérences topologiques que nous devons détecter et régler avant le prochain pas de temps en modifiant le modèle topologique.

Dans le reste de cette section, nous présentons les opérations de traitement des incohérences topologiques. Après avoir décrit le contexte général de notre approche, nous décrivons les quatre opérations atomiques qui seront utilisées dans la section 4 pour implémenter des scénarios d'évolutions plus complexe.

3.1. Contexte général et détection des incohérences

Nous supposons que notre modèle topologique est capable de représenter à la fois les informations géométriques et topologiques et plus spécifiquement les relations entre les sommets, arêtes, faces et volumes : une arête à partir d'un sommet, une face à partir d'une arête, un volume à partir d'une face, et les volumes adjacents à un volume. Nous considérons que les faces sont planes pour simplifier la détection de collision ; les faces non planes sont triangulées dans une étape préliminaire.

Les déplacements des sommets sont stockés comme des segments $P_t P_{t+1}$ dans une file d'attente, triée selon l'instant de la collision avec une arête ou une face bordant le volume. Quand le premier élément a été traité et retiré de la file, nous devons recalculer l'instant de collision de tous les éléments restants pour les cas de collisions avec les arêtes ou faces que nous venons de modifier. Si le sommet traverse une arête ou une face au point de collision P_t , nous devons également réinjecter le déplacement $P_t P_{t+1}$ dans la file pour prendre en compte de possibles collisions avec d'autres volumes. Cette procédure est répétée tant que la file n'est pas vide après chaque pas de simulation.

Finalement, même si le déplacement des sommets peut se faire dans n'importe quelle direction, nous nous limitons aux déplacements qui impliquent une perte de volume, comme dans le plus commun des cas dans une simulation d'érosion. Cette *contrainte contextuelle* signifie que les phénomènes de

sédimentations ou d'autres qui ajouteraient un peu de volume au terrain 3D sont interdites, néanmoins de tels cas seraient traités de manière symétrique au cas de l'érosion.

Un sommet P sur le terrain 3D appartient toujours à plusieurs arêtes et faces, et à un ou plusieurs volumes, identifiés en temps constant grâce au modèle topologique. Pendant son déplacement de la position P_t à P_{t+1} , il peut entrer en collision avec différents éléments. Puisque les déplacements ne peuvent pas impliquer de gains de volume, P peut seulement glisser sur une face (et potentiellement collisionner un sommet ou une arête appartenant au bord de cette face), ou se déplacer dans le volume (et potentiellement entrer en collision avec une face appartenant au volume). Dans ce dernier cas, soit le déplacement s'arrête à l'intérieur du volume, soit P entre en collision avec le bord du volume ; afin de limiter le nombre de cas étudié, nous supposons que P entre en collision toujours avec une face en utilisant une légère perturbation pour éviter les collisions avec les sommets et les arêtes.

Ainsi, la détection d'incohérence revient à quatre cas potentiels, décrits dans la section suivante :

- P se déplace mais appartient à plusieurs volumes, ce qui implique un pré-traitement (section 3.2)
- P glisse le long d'une face et entre en collision avec un sommet ou une arête (section 3.3)
- P entre en collision avec une face, cela peut soit créer un trou (section 3.4), soit "pincer" le volume et le couper en deux parties (section 3.5)

Dans tous les autres cas, le déplacement de P n'implique pas de modification topologique et peut être retiré de la file d'événements.

3.2. Sommet appartenant à plusieurs volumes

À cause des contraintes contextuelles mentionnées dans la partie précédente, le déplacement d'un sommet appartenant à plusieurs volumes peut ne pas impliquer de problème topologique mais il ne doit pas impliquer de gain de volume. Par conséquent, un pré-traitement est nécessaire afin de différencier le comportement du sommet pour chaque volume auquel il appartient.

Considérons par exemple la configuration initiale de la Fig.3a, avec un sommet appartenant à deux volumes différents, chacun avec ses propres propriétés d'érodabilité. Ici, nous supposons que le volume supérieur possède une plus grande résistance à l'érosion. Déplacer simplement le sommet va à l'encontre des contraintes contextuelles (Fig. 3b). Pour résoudre ce problème, nous divisons le sommet en deux, avec les deux positions P_t et P_{t+1} , et nous créons de nouvelles faces pour les connecter à leur volume respectif. Désormais, chacun des deux sommets appartient à un seul volume, et nous pouvons les réinjecter dans la file d'événements pour être déplacés selon la simulation géomorphologique (Fig. 3c).

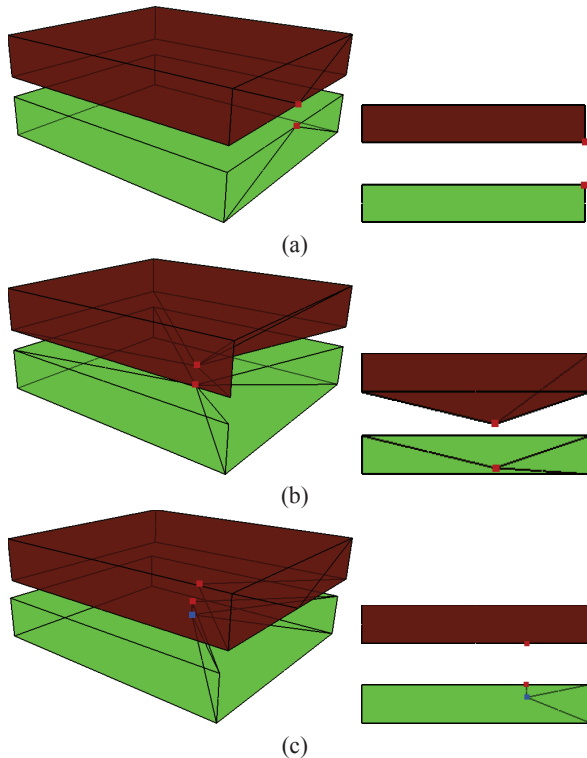


Figure 3: (a) Vue éclatée et en coupe de la configuration initiale où deux volumes partagent un sommet commun en rouge. Le volume supérieur possède une résistance à l'érosion plus élevée. (b) Le sommet se déplace vers le centre et légèrement vers le bas, ce qui mène à une croissance du volume supérieur. (c) Le sommet est divisé en deux (rouge et bleu) pour gérer la déformation du seul volume inférieur.

Dans cet exemple, nous pourrions également éroder le volume supérieur si sa résistance à l'érosion était plus faible. Si un sommet appartient à plus de deux volumes, nous choisissons aléatoirement deux volumes reliés par une face et nous répétons les opérations mentionnées précédemment jusqu'à ce que les sommets ainsi créés appartiennent à un seul volume.

3.3. Sommet glissant sur une face

Un sommet P avec un déplacement $P_t P_{t+1}$ glisse sur une face si et seulement si il existe une face F à laquelle appartient P_t et si P_{t+1} se situe sur la face F , ou si $P_t P_{t+1}$ intersecte une arête de la face F , comme sur la Fig. 4a. Si P entre en collision avec une arête, nous devons effectuer une opération topologique pour insérer un nouveau sommet sur cette arête correspondant au point d'intersection (Fig. 4.b). Ensuite, le reste du déplacement est réinjecté dans la file d'événements, comme expliqué dans la section 3.1.

Nous utilisons également la technique de perturbation

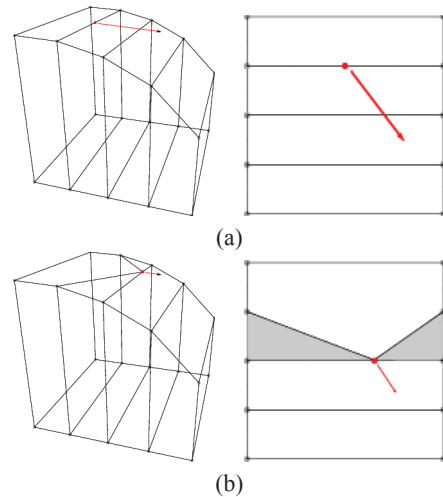


Figure 4: (a) Vue 3D et de dessus d'un sommet glissant sur une face et entrant en collision avec une arête. (b) Un nouveau sommet est créé au point d'intersection afin de changer la topologie de la face avant de poursuivre la simulation.

mentionnée précédemment pour éviter les cas de collision sommet - sommet, en modifiant légèrement le déplacement afin de revenir au cas présenté dans la Fig. 4.

3.4. Collision sommet-face

Nous considérons les collisions entre le déplacement du sommet P et une face appartenant au même volume. Deux cas peuvent arriver, selon si la face est connectée par au moins une arête au sommet P ou non.

Dans ce dernier cas, illustré par la Fig. 5, nous devons créer un polygone qui forme le trou dans la face ; ces sommets sont l'intersection des arêtes adjacentes à P avec la face. Après la création du trou, le volume supplémentaire ajouté par le déplacement de P est supprimé. Finalement, afin de maintenir des relations d'adjacence cohérentes dans le modèle et éviter d'utiliser d'autres structures de données comme les arbres d'inclusion, nous relierons par une arête le bord de la face au trou comme sur la Fig. 6. Selon la simulation, il est possible que la face entrant en collision avec P appartienne également à un autre volume. La seule différence est que nous ne supprimons pas le volume supplémentaire ajouté en déplaçant P (voir Fig. 5d).

Dans le cas du sommet P entrant en collision avec une face reliée à P par au moins une arête, trois cas différents peuvent se produire :

1. si P est relié par seulement une arête, nous contractons simplement cet arête (Fig. 7a) ;
2. si P est relié par deux arêtes comme sur la Fig. 7b : nous insérons une nouvelle arête reliant P à la face, et nous traitons ce cas comme le cas 3 ;

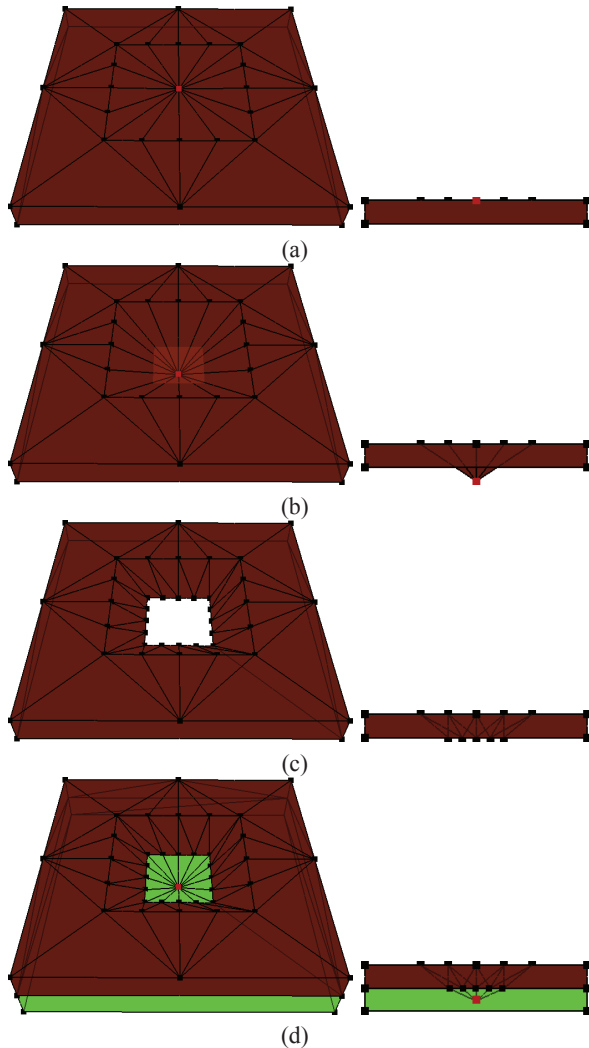


Figure 5: Vue 3D et en coupe du sommet "forant" le volume. (a) Configuration initiale où le sommet en rouge devra être déplacé vers le bas. (b) Incohérence géométrique si le sommet traverse la face inférieure. (c) Un trou est créé et le volume supplémentaire est supprimé. (d) Si la face appartient à deux volumes, un petit creux est créé dans le volume inférieur.

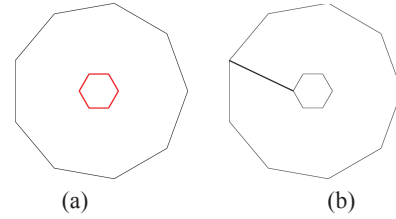


Figure 6: (a) Une face polygonale avec un trou marqué en rouge. (b) Insertion d'une arête entre le trou et le bord de la face. Aucune arête existante ne doit être intersectée par celle-ci.

3. si P est relié par plus de trois arêtes, nous contractons toutes les arêtes en une seule fois, sauf les extrêmes (Fig. 7c).

Cette approche apporte un traitement générique pour n'importe quel nombre d'arêtes reliant le sommet P à la face, et aide au maintien de la cohérence topologique comme sur la Fig. 7 (à droite).

Finalement, tout sommet nouvellement créé est réinjecté dans la file d'événements et peut continuer son déplacement.

3.5. Pincement de volume

Quand un volume est modifié à cause d'une collision sommet-face comme décrit dans la section précédente, il peut être géométriquement "pincé" comme illustré par la Fig. 8b. Nous devons alors appliquer une opération topologique afin de couper les faces pincées incidentes au sommet P . Ce traitement est très similaire à celui décrit lors du glissement de sommets (voir section 3.3). Pour détecter ce type de cas, nous parcourons les arêtes des faces incidentes à P : si nous rencontrons le sommet P plus d'une fois lors d'un cycle de parcours d'une face, alors P est un "point de pincement".

4. Implémentation et résultats

4.1. Cartes généralisées et Moka

Nous utilisons le modèle topologique des "cartes généralisées" [Lie94] pour subdiviser les objets géométriques en cellules (sommets, arêtes, faces, etc.) liées entre elles par relations d'adjacence / incidences. Une carte généralisée de dimension n (ou n -G-carte) est un ensemble d'éléments abstraits appelés brins, défini d'une manière homogène dans toute dimension n et associé à des involutions respectivement notés $\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_n$. Nous utilisons des 3-G-cartes puisque nous souhaitons représenter sommets, faces, arêtes et volumes. Chaque cellule (sommet, arête, face, volume) est formée par un ensemble de brins appelé *orbite* reliés par des involutions α_i ; par exemple, l'*orbite* sommet associée à un brin d est l'ensemble des brins reliés par un combinaison des involutions $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ à partir de d . Notons aussi que des

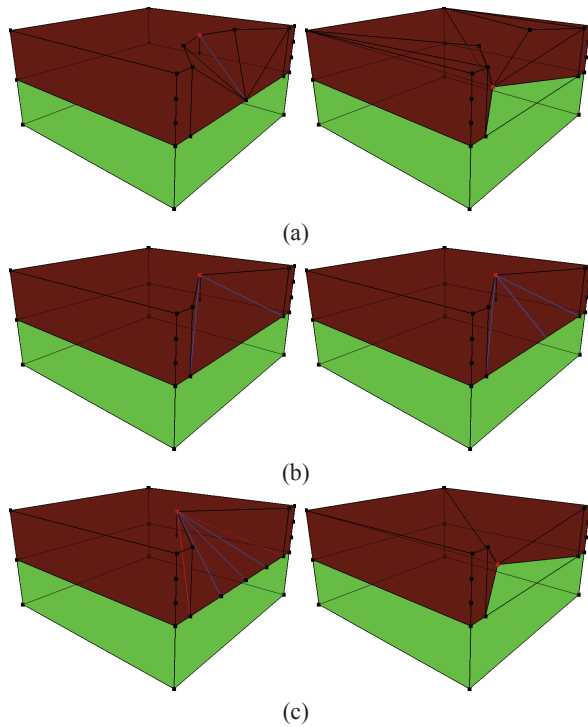


Figure 7: Le sommet en rouge est déplacé verticalement vers le bas et entre en collision avec une face partagée par deux volumes. (a) Le sommet est relié à la face percutée par une seule arête marquée en bleu : cette arête est simplement contractée. (b) Relié par deux arêtes : une nouvelle arête est créée. (c) Relié par plus de deux arêtes : toutes les arêtes sont contractées sauf les arêtes extrêmes marquées en rouge.

cellules de dimension i (avec $0 \leq i \leq n$) adjacentes sont liées par l'involution α_i .

A titre d'exemple, nous montrons comment implémenter l'opération 2D de division d'une face décrite dans la section 3.3. La Fig. 9 affiche les relations α_1 en rouge et les α_2 en vert, les sommets représentés en gris et les brins par des segments noirs. Sur la configuration initiale (Fig. 9a), $\alpha_1(a) = b$, $\alpha_1(b) = a$, $\alpha_1(c) = d$ et $\alpha_1(d) = c$, ce qui signifie que deux orbites sommets distinctes (ou sommets) doivent être fusionnées. Les arêtes correspondant aux brins c et d sont connectées à la face inférieure par α_2 . Pour diviser la face supérieure, nous devons d'abord supprimer les relations α_1 (Fig. 9b), puis recréer des liens de la manière suivante : $\alpha_1(a) = d$, $\alpha_1(b) = c$, $\alpha_1(c) = b$ et $\alpha_1(d) = a$. Maintenant tous les brins appartiennent à la même orbite sommet (Fig. 9c), cela peut être vérifié par exemple en partant du brin a , pour lequel b peut être atteint par le chemin $(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_1, \alpha_2 \text{ et } \alpha_1)$.

Cette opération comme les autres opérations atomiques décrites dans la section précédente est implémentée dans

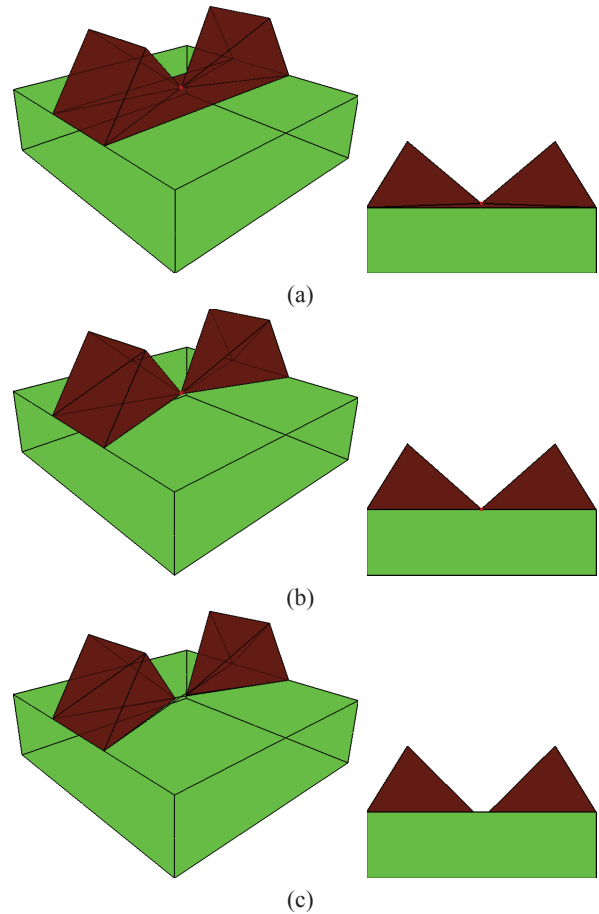


Figure 8: Vue 3D et en coupe d'un volume pincé. (a) Configuration initiale où le sommet en rouge est déplacé verticalement vers le bas. (b) Détection du pincement. (c) Le sommet est divisé pour créer deux sous-volumes. La vidéo correspondant à cette figure peut être vue ici : <http://vimeo.com/user7861676>

MOKA, un modèleur géométrique 3D basé un noyau de cartes généralisées [VD], qui contient différentes opérations comme la création d'objets basiques, l'insertion, la suppression ou contraction de cellules, la triangulation, etc. L'insertion de cellules et la triangulation sont utilisées par exemple pour traiter les faces non planes (voir section 3.1) et les trous (section 3.4). Nos opérations sont implémentées dans une bibliothèque séparée qui interagit avec le noyau et les bibliothèques du modèleur. La Fig. 10.a montre une vue de notre application.

4.2. Évolutions de scénarios complexes

L'utilisateur peut interagir avec notre application pour générer le terrain initial et appliquer des scénarios complexes. Ces scénarios sont implémentés par une combinai-

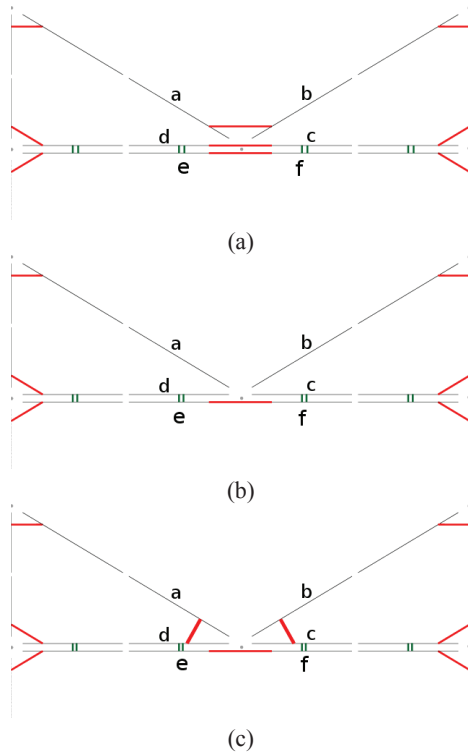


Figure 9: Implémentation d'une division de face avec une carte généralisée.

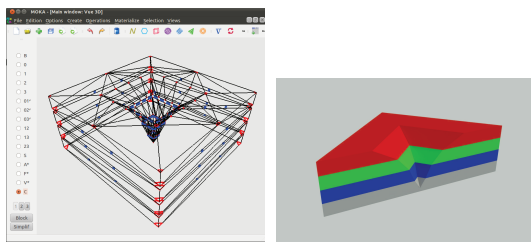


Figure 10: Un sommet traversant plusieurs couches. (a) Modélisé avec Moka. (b) Vue en coupe.

son d'opérations atomiques et appliqués à des sommets spécifiés par l'utilisateur. Dans le premier scénario, un terrain défini par une pile de différents matériaux et est itérativement érodé par un sommet, comme illustré par la Fig. 10. Cet exemple montre une combinaison de collisions sommet-face pour forer les couches successives, et le glissement de sommets sur une face pour progressivement élargir le trou. La vidéo correspondant à cette figure peut être vue ici <http://vimeo.com/user7861676>

Le second exemple représente deux volumes, l'un est progressivement érodé à la base pour former une arche (voir Fig. 1). Un sommet appartenant aux deux volumes est d'abord di-

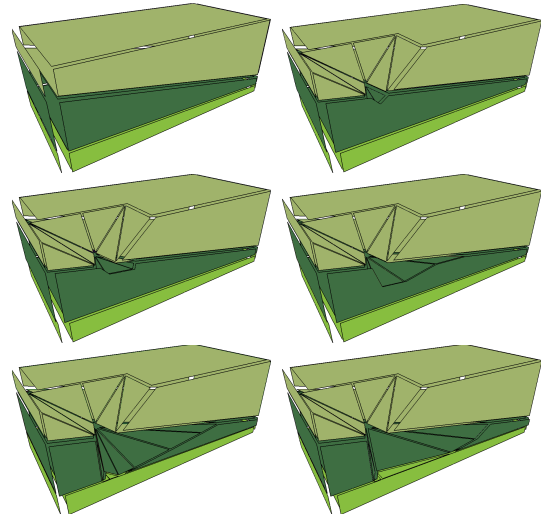


Figure 11: Vue en coupe d'une caverne créée par érosion d'une couche.

visé à la base de l'arche, et glisse le long de la base jusqu'à atteindre l'autre côté. Le volume bleu est alors pincé, et finalement l'arche est élargie par des collisions sommet-face successives.

Le dernier exemple montre comment l'érosion différentielle peut être réalisée grâce à notre approche, comme illustré par la Fig. 11 avec une vue en coupe. La couche du milieu est constituée d'un matériau plus érodable que les couches supérieure et inférieure, ce qui conduit progressivement à la création d'une caverne.

Ces exemples montrent la capacité de notre approche à maintenir les relations topologiques durant un scénario d'évolution complexe, en évitant des auto-intersections inattendues, des trous, ainsi de suite. Elle s'appuie sur des opérations atomiques exécutées en temps constant, et qui ne nécessitent pas une tétraédrisation coûteuse comme dans [TJ10]. Même si nos modèles actuels sont géométriquement et topologiquement simples, notre méthode travaille sur les bords du terrain 3D et non sur les volumes. Ainsi, nous pouvons détailler la représentation des zones qui subissent des déformations. La plupart du terrain 3D peut être représentée grossièrement et stockée de manière compacte par notre modèle de cartes généralisées, ce qui est un avantage conséquent par rapport aux grilles de voxels et structures de données en couches.

Il est aussi possible de raffiner géométriquement les bords si plus de précision est nécessaire pour la simulation géomorphologique, mais cette étape de raffinement doit préserver la topologie. Le raffinement peut aussi être utilisé pour rendre les images visuelles réalistes, proche des arches observées dans la nature (voir Figs. 12 et 13).

5. Conclusion et travaux futurs

Nous avons montré que la représentation d'un terrain 3D structuré avec un modèle topologique peut être utilisée pour simuler une évolution géomorphologique en définissant un ensemble réduit d'opérations atomiques. Ces opérations robustes maintiennent la cohérence topologique grâce à leur implémentation utilisant les cartes généralisées, et peuvent être utilisées pour simuler des scénarios d'évolutions complexes. Notre approche s'exécute en temps constant et est capable de gérer différentes topologies naturelles, comme les arches et les cavernes, sans avoir à stocker des géométries complexes.

Nous pensons qu'une simulation de fluide à base de particules pourrait facilement être rajoutée à notre modèle, et utilisée pour créer des scénarios d'érosions plus réalistes. Un travail supplémentaire est nécessaire pour définir les opérations atomiques correspondant à la sédimentation afin de déplacer des volumes sur le terrain 3D, et d'autres phénomènes géomorphologiques peuvent aussi être étudiés (tectonique des plaques, glaciations, etc).

Finalement, nous pourrions également considérer des mouvements de sommets non-rectilignes. Par exemple, quand un sommet glisse sur une face, celle-ci peut aussi être déformée (par une activité tectonique), qui provoque un mouvement non-linéaire au sommet. Puisque l'analyse de déplacements peut avoir un coût important en terme de calculs, nous pourrions étudier comment ce type de trajectoire est caractérisé géomorphologiquement et déterminer sa résolution de manière ad-hoc.

Références

- [BF01] BENEŠ B., FORSBACH R. : Layered data representation for visual simulation of terrain erosion. In *Spring conference on Computer Graphics* (2001).
- [BFO*07] BEARDALL M., FARLEY M., OUDERKIRK D., REIMSCHUSSEL C., SMITH J., JONES M., EGBERT P. : Goblins by spheroidal weathering. In *Eurographics Workshop on Natural Phenomena* (2007), Ebert D. S., Mérillou S., (Eds.), Eurographics Association.
- [BPC*10] BEZIN R., PEYRAT A., CRESPIN B., TERRAZ O., SKAPIN X., MESEURE P. : Interactive hydraulic erosion using cuda. In *Proceedings of the 2010 international conference on Computer vision and graphics : Part I* (Berlin, Heidelberg, 2010), ICCVG'10, Springer-Verlag, pp. 225–232.
- [BSP*04] BRANDEL S., SCHNEIDER S., PERRIN M., GUIARD N., RAINAUD J.-F., LIENHARDT P., BERTRAND Y. : Automatic building of structured geological models. In *Proceedings of the ninth ACM symposium on Solid modeling and applications* (Aire-la-Ville, Switzerland, Switzerland, 2004), SM '04, Eurographics Association, pp. 59–69.
- [BTHB05] BENEŠ B., TĚŠÍNSKÝ V., HORNÝŠ J., BHATTIA S. K. : Hydraulic erosion. *Computer Animation and Virtual Worlds* (2005).
- [CSC*10] CHEN Z., STUETZLE C., CUTLER B., GROSS J., FRANKLIN W. R., ZIMMIE T. : Quantitative analysis of simulated erosion for different soils. In *Proceedings of the 18th SIGSPATIAL International Conference on Advances in Geographic Information Systems* (New York, NY, USA, 2010), GIS '10, ACM, pp. 482–485.
- [DEJ*99] DORSEY J., EDELMAN A., JENSEN H. W., LEGAKIS J., PEDERSEN H. K. : Modeling and rendering of weathered stone. In *SIGGRAPH* (1999), pp. 225–234.
- [Edm60] EDMONDS J. : A combinatorial representation for polyhedral surfaces. *Notices Amer. Math. Soc.* Vol. 7 (1960).
- [IFMC03] ITO T., FUJIMOTO T., MURAOKA K., CHIBA N. : Modeling rocky scenery taking into account joints. In *Computer Graphics International* (2003), pp. 244–247.
- [JCD10] JUND T., CAZIER D., DUFOURD J.-F. : Edge collision detection in complex deformable environments. In *VRIPHYS* (2010), pp. 69–78.
- [KBKO09] KRISTOF P., BENEŠ B., KRIVANEK J., ONDREJ S. : Hydraulic erosion using smoothed particle hydrodynamics. In *Eurographics* (2009), pp. 219–228.
- [Lie91] LIENHARDT P. : Topological models for boundary representation : a comparison with n-dimensional generalized maps. *Computer-Aided Design*. Vol. 23, Num. 1 (1991), 59 – 82.
- [Lie94] LIENHARDT P. : N-dimensional generalized combinatorial maps and cellular quasi-manifolds. *Int. J. Comput. Geometry Appl.* Vol. 4, Num. 3 (1994), 275–324.
- [LSM08] LÉON P.-F., SKAPIN X., MESEURE P. : A topology-based animation model for the description of 2d models with a dynamic structure. In *VRIPHYS* (2008), pp. 67–76.
- [MDH07] MEI X., DECAUDIN P., HU B.-G. : Fast hydraulic erosion simulation and visualization on gpu. In *Pacific Graphics* (2007), pp. 47–56.
- [MMJM09] MICHAEL D. J., MCKAY F., JOSEPH B., MATTHEW B. : Directable weathering of concave rock using curvature estimation. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* (2009), 81–94.
- [Nag98] NAGASHIMA K. : Computer generation of eroded valley and mountain terrains. *The Visual Computer*. Vol. 13 (1998), 456–464. 10.1007/s003710050117.
- [NWD05] NEIDHOLD B., WACKER M., DEUSSEN O. : Interactive physically based fluid and erosion simulation. In *Eurographics Workshop on Natural Phenomena* (2005).
- [OF99] OZAWA N., FUJISHIRO I. : A morphological approach to volume synthesis of weathered stone. In *Volume Graphics* (1999), pp. 367–378.

- [PB07] PONS J.-P., BOISSONNAT J.-D. : Delaunay Deformable Models : Topology-Adaptive Meshes Based on the Restricted Delaunay Triangulation. In *Proceedings of the 20th IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition* (Minneapolis, France, 2007), IEEE, (Ed.), p. 200.
- [PGMG09] PEYTAVIE A., GALIN E., MERILLOU S., GROSJEAN J. : Arches : a Framework for Modeling Complex Terrains. *Computer Graphics Forum (Proceedings of Eurographics)*. Vol. 28, Num. 2 (2009), 457–467.
- [TGM*08] TERRAZ O., GUIMBERTEAU G., MERILLOU S., PLEMENOS D., GHAZANFARPOUR D. : 3gmap l-systems : an application to the modelling of wood. *The Visual Computer*. Vol. 25, Num. 2 (2008), 165–180.
- [TJ10] TYCHONIEVICH L. A., JONES M. D. : Delaunay deformable mesh for the weathering and erosion of 3d terrain. *Vis. Comput.*. Vol. 26 (December 2010), 1485–1495.
- [vBBK08] ŠT'AVA O., BENEŠ B., BRISBIN M., KŘIVÁNEK J. : Interactive terrain modeling using hydraulic erosion. In *Symposium on Computer Animation* (2008), pp. 201–210.
- [VD] VIDIL F., DAMIAND G. : Moka - a topology-based 3d geometric modeler (<http://moka-modeller.sourceforge.net/>).
- [WCMT07] WOJTAN C., CARLSON M., MUCHA P. J., TURK G. : Animating corrosion and erosion. In *NPH* (2007), Ebert D. S., Mérillou S., (Eds.), Eurographics Association, pp. 15–22.
- [ZLL07] ZHONG D., LI M., LIU J. : 3d integrated modeling approach to geo-engineering objects of hydraulic and hydroelectric projects. *Science in China Series E : Technological Sciences*. Vol. 50 (2007), 329–342. 10.1007/s11431-007-0042-0.
- [ZSTR07] ZHOU H., SUN J., TURK G., REHG J. M. : Terrain synthesis from digital elevation models. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*. Vol. 13 (July 2007), 834–848.



Figure 12: Une arche naturelle en bord de mer à Ibiza, et la Delicate Arch localisée dans le Arches National Park, Utah.



Figure 13: Une image visuellement réaliste d'une arche rendue avec Blender avec un raffinement géométrique et des textures de roches et d'océan.